

أداء انتقال الحرارة لمبادل حراري في دارة مطبوعة ذو قناة مموجة وتأثير عامل التموج

الدكتور: بسام القسام

كلية: الهيك جامعة: البعث

ملخص

المبادل الحراري للدارة المطبوعة PCHE مكون رئيسي في الدارات المستقبلية قليلة استهلاك الطاقة نتيجة ارتفاع أدائه في انتقال الحرارة وجساءة بنيته. في هذه الدراسة، تمت دراسة الأداء الحراري لمبادل حراري لدارة مطبوعة ذو قناة مموجة، وتأثير عوامل التموج: المطال والطول، على الأداء الحراري للمبادل بطرق عديدة. تمت مقارنة الأداء الحراري للمبادل الدارة المطبوعة ذو القناة المموجة مع مبادلات الدارة المطبوعة التقليدية ذات القناة المستقيمة. بناء على النتائج العددية، تبين أن المبادلات ذات القناة المموجة قادرة على تأمين أداء حراري أفضل بكثير من المبادلات التقليدية ذات القناة المستقيمة نتيجة زيادة سطح التبادل الحراري. تم تقدير أن تأثير إعادة تدوير الجريان الناتج من التموج مهماً للمجال النموذجي لتدفق CO₂ في مولدات الطاقة المضغوطة. كما تبين أن التحسين في الأداء قابل للتوقع باستعمال بارامتر لابعدى وحيد: النسبة بين المطال والطول، وأن له علاقة خطية مع البارامترات اللابعدية.

كلمات مفتاحية: دورة CO₂ فوق الحرجة

المبادل الحراري للدائرة المطبوعة

تموجي

The effects of waviness factors and heat transfer performance of wavy-channeled PCHEs.

Dr. Eng. Bassam Alkassam

Abstract

The printed circuit heat exchanger (PCHE) is a key component in the future compact energy cycles due to its high heat transfer performance and structural rigidity. In this study, the thermal performance of wavychanneled PCHEs, and the effects of the waviness factors: the amplitude and the period, on the thermal performance of the PCHE are investigated numerically. The thermal performance of the wavy-channeled PCHEs is compared with that of conventional PCHEs with straight channels. Based on the numerical results, it has been shown that the wavy-channeled PCHEs can have significantly higher thermal performance than the conventional straight-channeled PCHEs due to the increased area for heat transfer. The effect of recirculating flow induced by the waviness is estimated to be negligible for the typical range of CO₂ mass flow rate of compact power generations. It has been shown that the performance enhancement can be predicted using a sole nondimensional parameter: the ratio between amplitude and period, and has linear relationship with this nondimensional parameter.

Keywords:

Supercritical CO₂ cycle

PCHE

Wavy

1- مقدمة:

يعتبر S-CO₂ (ثاني أكسيد الكربون الفائق) خياراً مفضلاً كمائع عامل بسبب انخفاض لزوجته، وارتفاع موصليته الحرارية. لذلك، يصنف S-CO₂ عادة كمكون رئيسي في دارات توليد الطاقة المضغوطة المستقبلية، بسبب هذه الخصائص التي توفر ملاءمة جيدة مع المواد القياسية ولأنه يخفف من عمل الانضغاط [1-3]. إضافة لذلك، من المعروف أن S-CO₂ يسمح بوجود عنفات وضواغط مضغوطة وعملية، إضافة لتوافر منابع حرارية بسهولة نتيجة انخفاض درجة الحرارة والضغط اللازمين للحفاظ على الظروف الحرجة [4, 5]. في دارات S-CO₂، يستخدم المبادل الحراري كمسخن، مكثف، وموفر، وبالتالي يعد من العناصر الحساسة في دارة S-CO₂، مما يؤثر في كفاءة تحويل الطاقة الإجمالية [6]. من بين الأنواع المختلفة للمبادلات الحرارية، يعد المبادل الحراري ذو الدارة المطبوعة PCHE من الخيارات الشائعة لنقل الحرارة في S-CO₂ نتيجة كثافة سطحه الكبيرة وجسائه الإنشائية [7]. يتكون PCHE عادة من طبقات من الصفائح الملصقة ببعضها بحيث تتشكل قنوات نصف دائرية بنصف قطر هيدروليكي بحدود 1mm وذلك بالتميش الكيميائي [8].

أجريت دراسات عدة فيما يخص أداء الانتقال الحراري لمبادلات PCHE. طور Kim [9] and No نموذجاً فيزيائياً وأساسيات للتصميم الأمثل لمبادلات PCHE من أجل المبادلات المتوسطة في HTGRs. اختبر Kim et al [10] الأداء الهيدروليكي لقنوات PCHE الميكروية. طور [11] Beak مبادل PCHE تبريدي وتحقق من تأثير التوصيل المحوري على الأداء الحراري. ركزت العديد من الدراسات الحديثة على القنوات المموجة أو قنوات الز كزك لمبادلات [12-16] PCHE وبينت أن هذه القنوات قادرة على تحسين أداء انتقال الحرارة بشكل كبير مقارنة بالمبادلات التقليدية ذات القنوات المستقيمة، في حين أن الزيادة في هبوط الضغط بسيطة. اعتبرت دراسات أخرى مبادلات PCHE بشكل محوري جيبّي، متقوس، بمقطع جناح، وبشكل حرف [17-19] S. بالخلاصة، أجريت دراسات مكثفة حول مبادلات PCHE ذات القنوات المموجة بهدف تحسين انتقال الحرارة. لكن، بينت الدراسات السابقة حول القنوات المموجة في مبادلات PCHE التأثير

النوعي فقط للبارامترات الهندسية على الأداء الحراري بنطاق محدود جدا، ولا توجد دراسة جديدة تركز على تأثير البارامترات الهندسية على الأداء الحراري لمبادلات PCHE ذات القناة المموجة بصورة كمية.

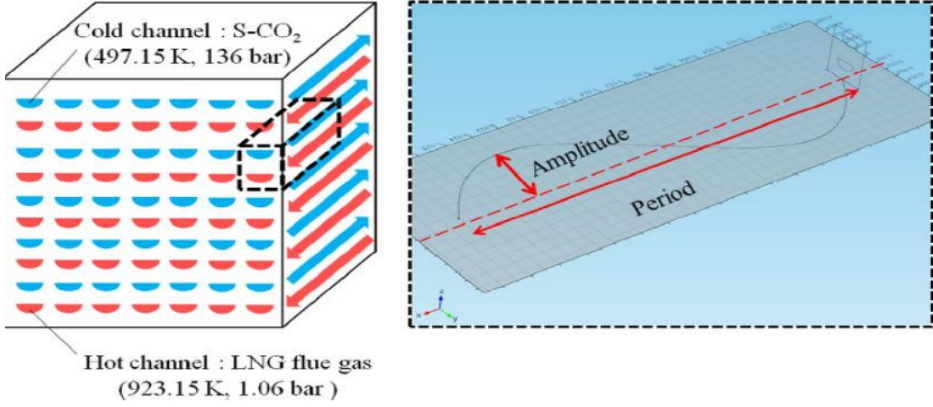
في هذه الدراسة، ستتم دراسة الأداء الحراري لمبادل PCHE ذو قنوات مموجة، وتأثير عوامل التموج: المطال والطول، على الأداء الحراري للمبادل بطريقة عددية. ستتم مقارنة الأداء الحراري لمبادل PCHE مموج القناة مع مبادل PCHE تقليدي بقناة مستقيمة. إضافة لذلك، سيتم تطوير علاقة تربط الأداء الحراري لمبادل PCHE مموج القناة كتابع لعوامل التموج وغيرها من البارامترات الهندسية. يمكن استخدام العلاقة المفترضة في مجال واسع لتصميم PCHE.

2. الدراسة العددية

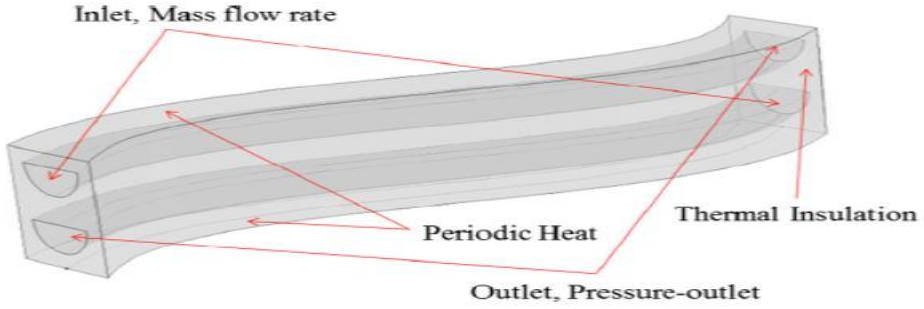
يوضح الشكل 1 الدراسة العددية الحالية. تفترض هذه الدراسة مبادل PCHE مموج القناة خاضع لجريان معاكس كما يوضح الشكل 1. عاملا التموج: المطال والطول، موضحان على الشكل أيضا. يوضح الشكل 2 الشبكة والشروط الحدية للدراسة العددية. في قناة المائع البارد، يتدفق S-CO₂، ويتدفق LNG (غاز طبيعي مسيل) في قناة المائع الساخن. ضبطت درجة الحرارة والضغط على المدخل بقيم مطابقة لتلك الملحوظة في منشآت S-CO₂ التي تستطيع توليد عدة كيلوواتات من الطاقة [6]، كما يوضح الشكل 1. ضبطت درجة حرارة وضغط الدخل على الشروط الحرجة لغاز CO₂ وهي 136bar و497K، للحفاظ على الشروط الحرجة. ضبط ضغط دخل LNG لقيمة قريبة من الضغط الجوي بسبب عدم الحاجة للتحكم بطور LNG. استخدم الفولاذ 316 كمادة صلبة لأن المادة المستخدمة عموما أثناء تصنيع PCHE، نتيجة مطيبيته في ظروف درجات الحرارة المرتفعة والضغط المرتفع غير المنتظمين. تعتبر الدراسة العددية الحالية الخلية الواحدية كنموذج عددي وتم تقدير الأداء الحراري الإجمالي للمبادل الحراري بناء على نتيجة الخلية الواحدية. بهدف التأكد من تأثير التوصيل المحوري في PCHE، اعتبرت المعادلة التالية [20].

$$\frac{k_w A_w}{m c_p L} \ll 1 \quad (1)$$

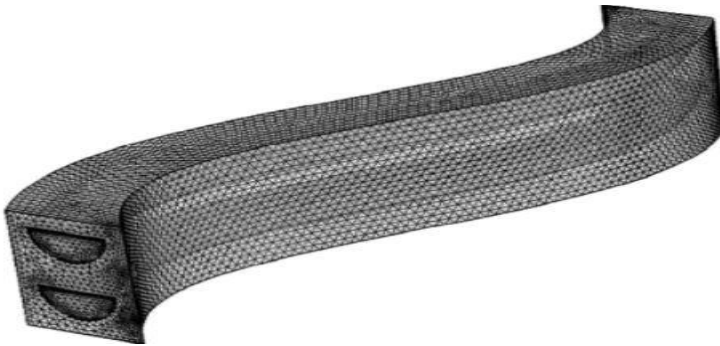
يهمل التوصيل المحوري مقارنة بانتقال الحرارة بالحمل عندما تتحقق المعادلة (1). في المعادلة (1)، k_w هو الموصلية الحرارية للمادة الصلبة، A_w مساحة المقطع العرضي لانتقال الحرارة بالتوصيل، \dot{m} التدفق الكتلي للموائع، c_p السعة الحرارية، و L طول القناة. في النماذج العددية الموضحة في الشكلين 1 و2، يقدر الحد $k_w A_w / m c_p L$ بحدود $O(0.001)$. بالتالي، التوصيل المحوري، أي التوصيل عبر اتجاه مسقط الشكل 1، مهمل في الدراسة الحالية، وبالتالي تطبق شروط العزل الحراري الحديدية على الأسطح الجانبية للخلية الواحدية. يمكن إهمال التوصيل في المحور التالي نتيجة تكرار بنية الخلية الواحدية. يمكن لتأثير التوصيل المحوري في الخلية الواحدية أن يمثل كامل التوصيل في المبادل الحراري، نتيجة أن سلوك التوصيل الحراري لا يتأثر بتراكب طبقات الخلية الواحدية. عند الأسطح العلوية والسفلية للخلية الواحدية، تطبق شروط حدية دورية لضمان أن القناة تتفاعل حرارياً مع القنوات المجاورة المفترضة [6]. عند مدخل القنوات، يعرف شرط حدي للتدفق الكتلي، في حين يعطى ضغط المخرج كشرط حدي على مخرج القناة. على طول الاتجاه المحوري للقنوات، تطبق شروط حدية دورية لضمان أن بروفايلات السرعة عند المدخل والمخرج تطابق بعضها. يمكن للأداء الحراري للخلية الواحدية أن يمثل الأداء الحراري للمبادل ككل نتيجة التطور الحراري والهيدروليكي على طول الاتجاه المحوري. بهدف اعتبار التطور الحراري والهيدروليكي، تم اختيار عدة خلايا واحدية عند مواقع مختلفة في الاتجاه المحوري، وتم التنبؤ بالأداء الحراري لكامل PCHE بناء على تقدير المتوسطات الموزونة من عدة خلايا واحدية.



الشكل 1 مخطط للدراسة العددية (يمثل المربع المنقط خلية واحدة)



(a) الخلية الواحدة والشروط الحدية



(b) شكل الشبكة

الشكل 2 النموذج العددي

كما يوضح الشكل 2(a)، تتكون الخلية الواحدية من مجالين للموائع (المائع الساخن والمائع البارد)، ومن مجال صلب. في المجال الصلب، يتم حل قانون فورييه للتوصيل في حين تحل معادلات نافير ستوكس ومعادلة الطاقة في مجالي الموائع. يوضح الشكل 2(b) الشبكة العددية. بينت الدراسة أن شكل الشبكة للقناة المموجة مماثل لتلك المستخدمة في قناة مستقيمة [6]. لكن لوحظ أن عدد الخلايا أكبر قليلاً عند التموج نتيجة زيادة عدد الخلايا بالقرب من الحد المموج. لكن، لا يعد الاختلاف في عدد الخلايا مهماً.

تم تقييم الخواص الحرارية للمائع العامل، S-CO₂، والمصدر الحراري (غاز LNG) بناءً على البرنامج المعروف [21] REFPROP، وهو المعروف بتوليد توقعات دقيقة حتى للموائع الحرجة. ربطت الدراسات السابقة خواص S-CO₂ وخواص LNG مع درجة الحرارة بالعلاقات التالية:

$$\rho = 2988.2529 - 19.00647T + 0.05254T^2 - 7.47748 \times 10^{-5}T^3 + 5.40055 \times 10^{-8}T^4 - 1.57353 \times 10^{-11}T^5$$

$$\mu = 1.12473 \times 10^{-4} - 7.16636 \times 10^{-7}T + 2.1884 \times 10^{-9}T^2 - 3.19601 \times 10^{-12}T^3 + 2.33796 \times 10^{-15}T^4 - 6.8692 \times 10^{-19}T^5$$

$$k = 165.39919 - 1.07952T + 0.0033T^2 - 4.75879 \times 10^{-6}T^3 + 3.45935 \times 10^{-9}T^4 - 1.01277 \times 10^{-12}T^5$$

$$c_p = 20.14959 - 0.13704T + 3.98411 \times 10^{-4}T^2 - 5.8663 \times 10^{-7}T^3 + 4.28421 \times 10^{-10}T^4 - 1.26468 \times 10^{-13}T^5$$

(2)

$$\rho = 2.85262 - 0.00952T + 1.68145 \times 10^{-5}T^2 - 1.65986 \times 10^{-8}T^3 + 8.68221 \times 10^{-12}T^4 - 1.88032 \times 10^{-15}T^5$$

$$\mu = 7.78234 \times 10^{-7} + 5.91898 \times 10^{-8}T - 3.2726 \times 10^{-11}T^2 \\ + 1.98046 \times 10^{-14}T^3 - 7.59506 \times 10^{-18}T^4 \\ + 1.33518 \times 10^{-21}T^5$$

$$k = 2.89404 + 0.06875T + 8.9142 \times 10^{-6}T^2 - 1.83721 \\ \times 10^{-8}T^3 + 1.29873 \times 10^{-11}T^4 - 3.40167 \\ \times 10^{-15}T^5$$

$$c_p = 1.17986 - 6.32096 \times 10^{-4}T + 1.85471 \times 10^{-6}T^2 - 1.6634 \\ \times 10^{-9}T^3 + 6.81521 \times 10^{-13}T^4 - 1.07263 \\ \times 10^{-16}T^5$$

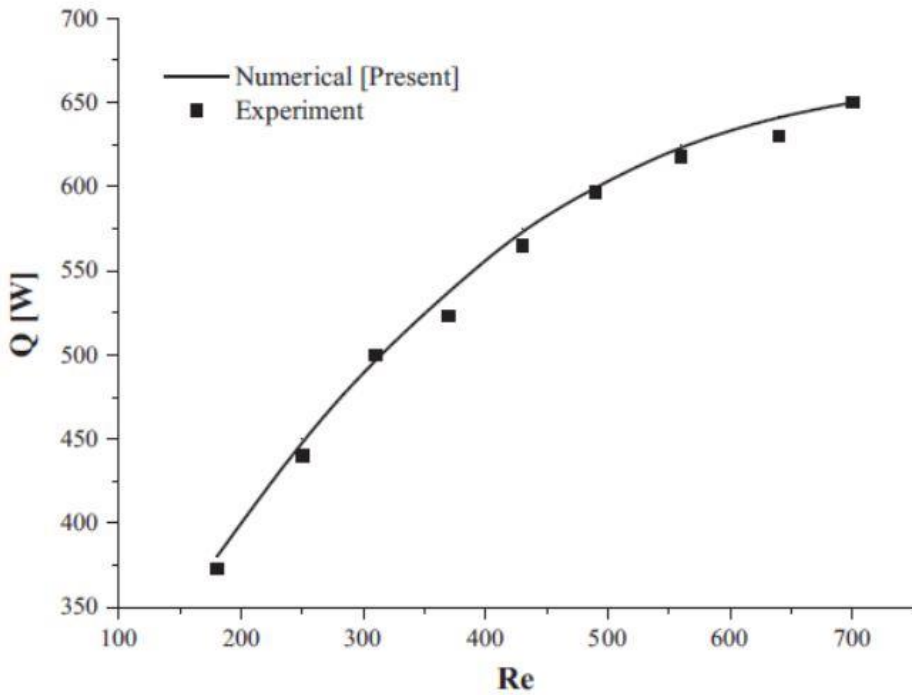
(3)

المعادلات (2) و(3) هي لكل من S-CO₂ و LNG عند 1bar، على التوالي. المجال الفعال للمعادلات (2) و(3) هو 473K < T < 773K و 573K < T < 973K، على الترتيب، والذي يغطي كامل مجال العمل المتوقع في أنظمة توليد الطاقة المضغوطة.

3. النتائج العددية

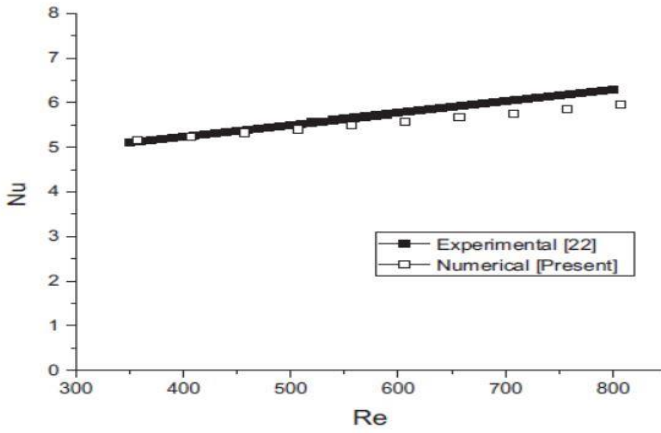
3.1 التحقق:

بهدف التحقق من النموذج العددي الحالي، أجريت مجموعة دراسات عددية مستقلة باستعمال PCHE بقناة مموجة. قورنت النتائج العددية مع النتائج المخبرية السابقة [5]. يوضح الشكل 3 مخطط للمقارنة بين تبدد الحرارة الكلي مع رقم رينولدز. كما يوضح الشكل، تتوقع نتائج النموذج العددي الحالي بالنتائج المخبرية ضمن حدود خطأ 8%. يبدو أن النتائج العددية تتوقع بزيادة بسيطة بالقيم مقارنة بالقيم التجريبية كما يوضح هذا الشكل. يعزى الفرق لحقيقة أن النموذج العددي الحالي لا يعتبر تأثير التوصيل المحوري، وعدم انتظام توزيع الجريان ضمن القنوات.

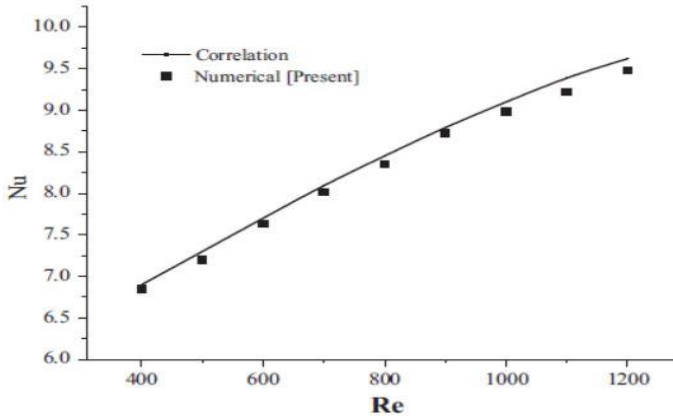


الشكل 3 مخطط للمقارنة بين النتائج العددية والتجريبية [5] لتبديد الحرارة الناتج لمبادل PCHE مستقيم القناة نسبة لرقم رينولدز (فولاذ 304L، حجم $PCHE = 141 \times 40 \times 16$ mm، عرض القناة 0.8mm، المائع البارد والمائع الساخن ماء، $T_{h,in}=400C$ ، $T_{c,in}=200C$)

أجريت عملية تحقق إضافية باستعمال نتائج تجريبية سابقة من مبادلات PCHE بقناة زك زاك [22]. يوضح الشكل 4 مخطط للمقارنة بين النتائج التجريبية والنتائج العددية لرقم نوسلت الوسطي نسبة لرقم رينولدز. كما يوضح الشكل، تتوافق النتائج العددية الحالية مع النتائج العددية السابقة وكذلك مع النتائج التجريبية ضمن هامش خطأ 5.2%. يعزى الاختلاف البسيط في النتائج عن القيم التجريبية السابقة لاختلاف خواص الهليوم المستخدم في المحاكاة العددية. لذلك، يعتبر النموذج العددي الحالي والطريقة المتبعة صالحين لتحليل مبادل PCHE ذو القناة المموجة.



PCHE = 150 x 144 x 896 حجم (سبيكة 800H، مع قناة زك زك (a)PCHE، عرض القناة 1.51mm، المائع البارد والمائع الساخن هليوم، $T_{h,in}=550\text{ C}^\circ$ ، $T_{c,in}=100\text{ C}^\circ$)

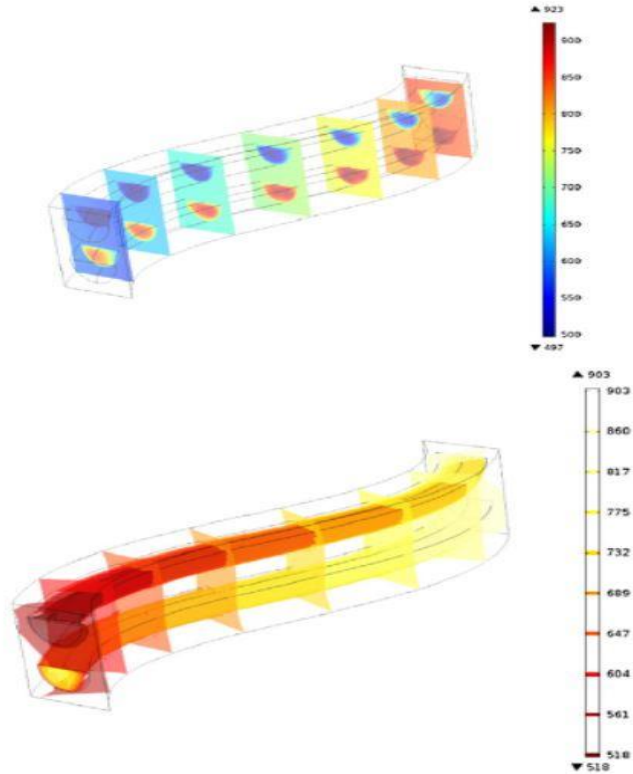


PCHE = 750 x 300 x 300 حجم (سبيكة 617، مع قناة مموجة (b)PCHE، عرض القناة 2mm، المائع البارد والمائع الساخن هليوم، $T_{h,in}=900\text{ C}^\circ$ ، $T_{c,in}=579\text{ C}^\circ$)

الشكل 4 التأكد من النموذج باستعمال نتائج سابقة لمبادل PCHE بقناة زك زك ومبادل PCHE بقناة مموجة [22, 23]

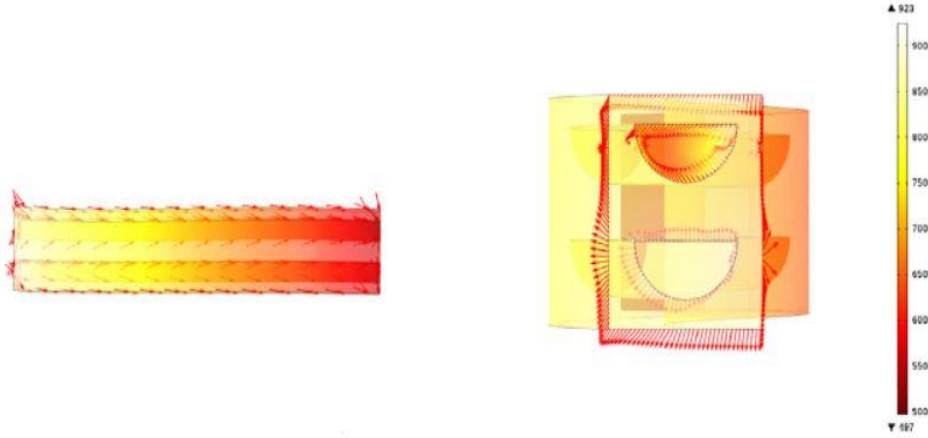
3.2 تأثير عوامل التمدج على الأداء الحراري

يبين الشكل 5 النتائج العددية. يوضح الشكل 5(a) مخطط درجات الحرارة للمقطع العرضي للخلية الواحدية في PCHE المختارة لدراسة الحالة العددية. في هذا الشكل، تعرض مجموعة من مخططات درجة الحرارة لمقاطع عرضية منتقاة (اليسار) ومخططات لدرجة الحرارة عند سطح تماس مائع/صلب (اليمين)، والتي توضح تغيرات درجة الحرارة في كلا الاتجاهين المحوري ومع المقطع العرضي. في الشكل 5(b)، وصف لنمط انتقال الحرارة كشعاع ثلاثي البعد، ويوضح أن الخلية الواحدية قادرة على التفاعل حرارياً مع الخلايا الافتراضية الجانبية.



(a) مخطط درجات الحرارة ثنائية البعد: مخططات درجة الحرارة عند بعض المقاطع

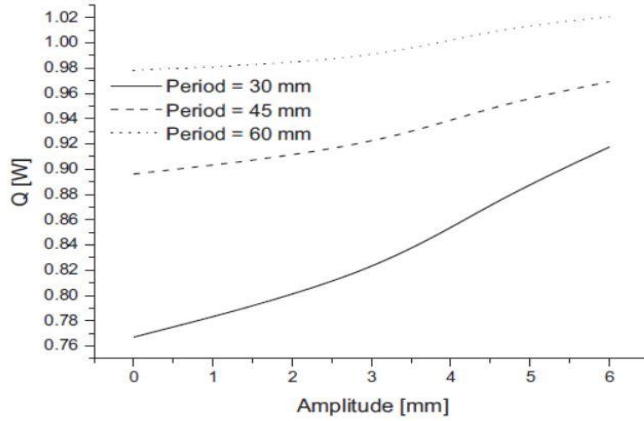
المختارة.



(b) نمط انتقال الحرارة ثلاثي البعد

الشكل 5 عرض للنتائج العددية

في هذه الدراسة، تم التحقق من تأثير عوامل التموج كمطال الموجة وطولها على الأداء الحراري، كما يبين الشكل 6. تجدر الملاحظة أن حجم الخلية الواحدية وقطرها ثابتين عند 1.8mm. كما يوضح الشكل، يظهر معدل التبدد الحراري نسبة لواحدة الكتلة في PCHE مموج القناة والذي يزداد مع زيادة مطال التموج. في هذا الشكل، تدل البيانات عند مطال يساوي الصفر على البيانات الناتجة من مبادل PCHE تقليدي مستقيم القناة بنفس حجم القناة وطولها. يبدو أن تموج القناة يحسن بشكل جيد من الأداء الحراري مقارنة بالمبادل PCHE التقليدي مستقيم القناة بقيمة 16.4%. يتناقص تزايد الأداء الحراري مع زيادة المطال. تأثير المطال على الأداء الحراري واضح بشكل أكبر عند القيم الأصغر لتموج الطول. يعزى تحسن الأداء بداية لزيادة سطح التبادل الحراري.



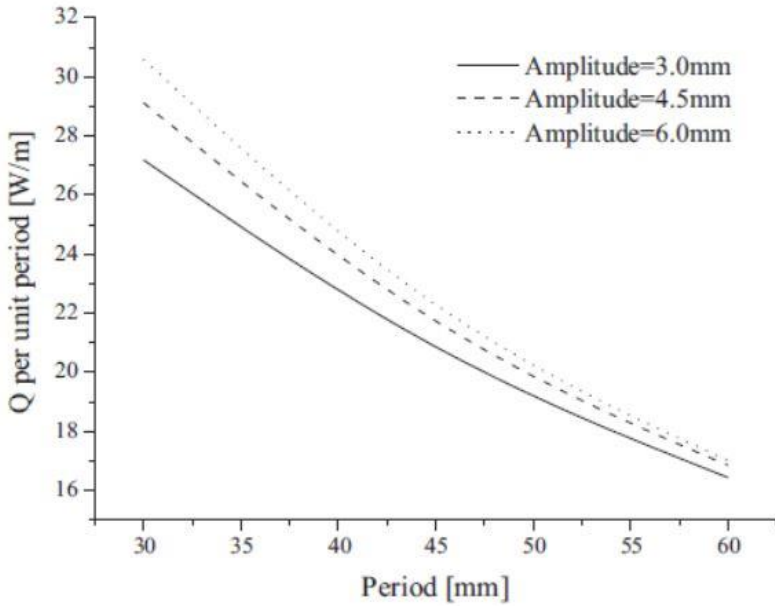
الشكل 6 تأثير مطال الموجة وطولها على الأداء الحراري.

3.3 الأداء الحراري نسبة لواحدة الطول

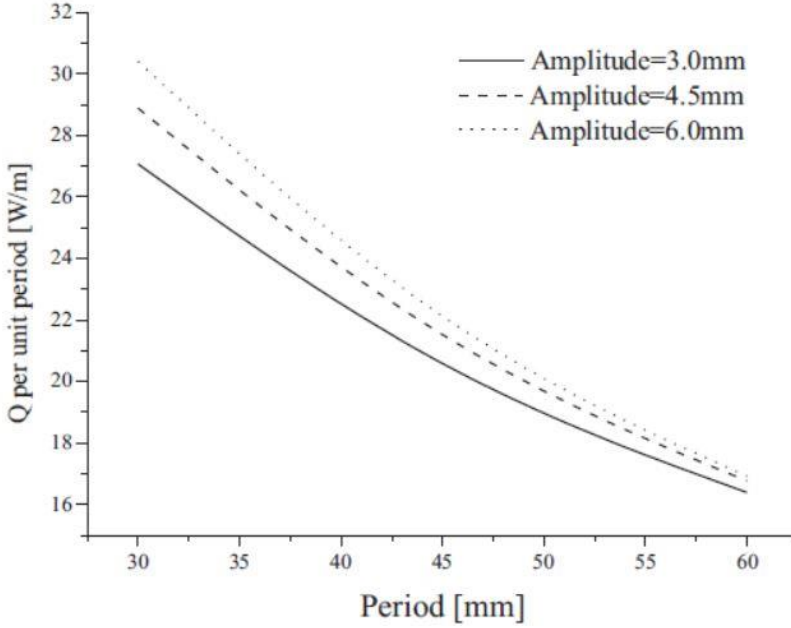
تجدر الإشارة إلى أن مساحة التبادل الحراري مرتبطة مباشرة مع طولها. بكلمات أخرى، فإن تحسين الأداء الحراري نتيجة مباشرة للتناسب مع الطول. لذلك، تجب مقارنة الأداء الحراري للمبادل PCHE مموج القناة عندما يخضع لواحدة طول ثابتة [W/m] للحصول على مقارنة عادلة.

يوضح الشكل 7 تأثير بارامترات التموج على الأداء الحراري لواحدة الطول لمبادل PCHE مع تأثير حجم القناة (D). يبين هذا الشكل أن لحجم القناة تأثير بسيط تقريبا على الأداء الحراري للمبادل PCHE مموج القناة. كما يوضح هذا الشكل أيضا أن الأداء الحراري لواحدة الطول سيتناقص مع زيادة الطول عند قيمة ثابتة للمطال وحجم القناة. يبدو أن الأداء الحراري لواحدة الطول يتزايد دوما مع زيادة المطال بغض النظر عن الطول وحجم القناة. بهدف تفسير هذه النتائج، أجري تحليل رياضي كما يلي. من أجل مطال واحد ثابت، أي بتثبيت المطال، تنتج زيادة المساحة من تموج القناة بعامل مقياس يعطى كتابع للمطال والطول كما يلي:

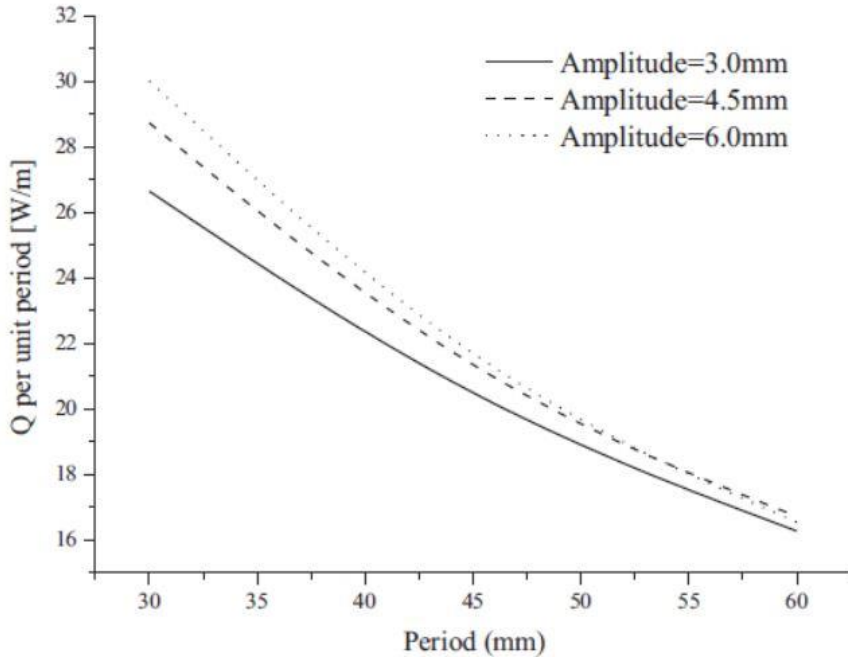
$$f = \left(2a^* + \frac{1}{8a^*} \right) \cos^{-1} \left(\frac{1 - 16a^{*2}}{1 + 16a^{*2}} \right) \quad (4)$$



(a) $D=1.5$ mm



(b) $D=1.8$ mm



(c) D=2.1mm

الشكل 7 تأثير البارامترات الهندسية على الأداء الحراري لواحدة طول الموجة.

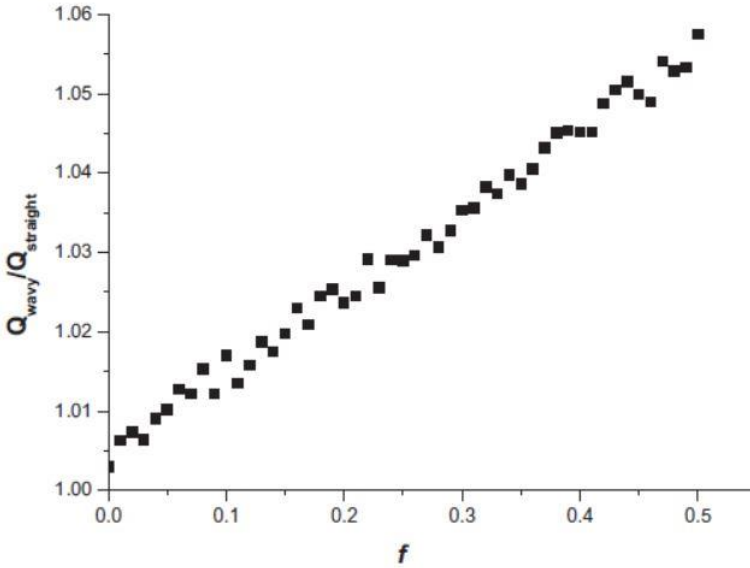
استنتجت المعادلة (4) بناء على المقارنة بين طول المنحني الجيبي والارتفاع العائد لمستقيم بنفس الخطوة. في المعادلة (4)، f هو عامل المقياس الذي يمثل مساحة المبادل PCHE مموج القناة مقسوما على مساحة السطح الراجع للمبادل PCHE مستقيم القناة بنفس الطول. للتعبير الرياضي الموضح في العلاقة (4) نقطة شاذة عند $a^*=0$. البارامتر a^* هو مقدار لابعدي لمطال التموج والذي يعرف بالشكل:

$$a^* = a/l \quad (5)$$

حيث a مطال الموجة و l طولها، والموضحة في الشكل 1. تجدر الإشارة إلى أن عامل المقياس مطابق للنسبة بين طول القناة الفعال وطول الموجة، إضافة لمساحة انتقال الحرارة الفعالة إلى مساحة انتقال الحرارة العائدة لمبادل PCHE مستقيم القناة، كما يلي:

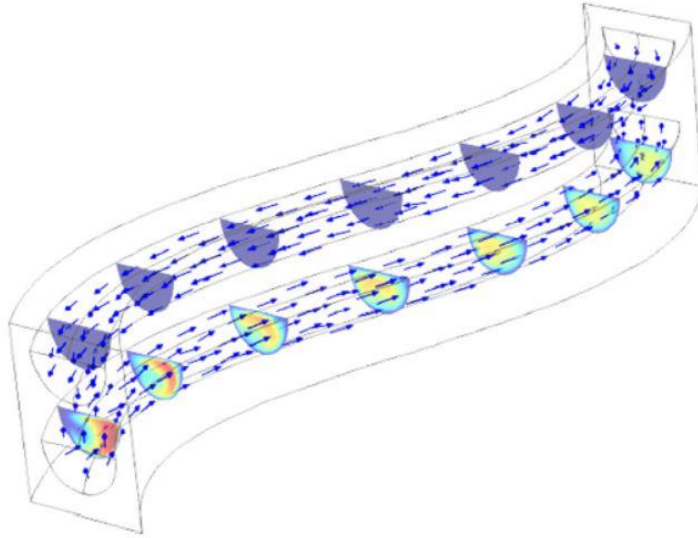
$$f = \frac{l}{l'} = \frac{A}{A'} \quad (6)$$

حيث l' طول القناة الفعال، A و A' هما مساحة انتقال الحرارة للمبادل PCHE مستقيم القناة ومموج القناة، على التوالي. تدل المعادلات (4) و(5) على أن مساحة انتقال الحرارة تزداد بشكل شبه خطي مع زيادة المطال عندما يثبت طول الموجة. وبالتالي، على سبيل المثال، يدل المطال 6mm على أن سطح التبادل الحراري يزداد بقيمة 1.34 مرة مقارنة بمبادل PCHE مستقيم القناة. يبدي الشكل 8 كميًا تأثير تكبير مساحة السطح في تحسين الأداء الحراري. يوضح هذا الشكل الأداء الحراري المتوقع للمبادل PCHE مموج القناة مقسوماً على الأداء الحراري لمبادل PCHE مستقيم القناة ($Q_{wavy}/Q_{straight}$) مقابل النسبة الدالة على سطوح انتقال الحرارة (f). كما يبين الشكل، يمكن لعامل الأداء الحراري لمبادل PCHE مموج القناة أن يكون تابع بشكل رئيسي للبارامتر f ، بغض النظر عن تفاصيل الشكل الهندسي، وله علاقة خطية مع f ، عندما $0 < f < 0.5$ ، إذا كان الجريان واقعا ضمن مجال الجريان الصفحي.

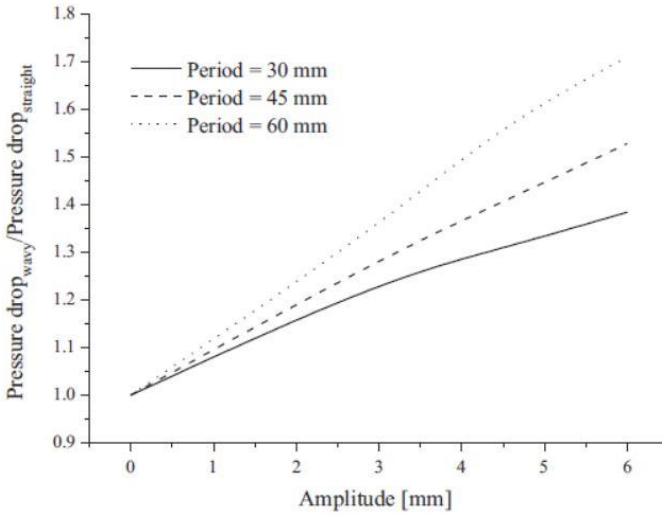


الشكل 8 تحسن Q مقابل زيادة السطح

ذكرت بعض الدراسات السابقة [15, 19] أن تموج القناة قد يسبب إعادة تدوير للجريان في منطقة زوايا التموج، مما يحسن أداء انتقال الحرارة بشكل كبير. تعارضت نتائج البحث الحالي مع النتائج السابقة من حيث أن التحسن في الأداء الحراري لمبادل PCHE مموج القناة راجع بشكل كبير لزيادة سطح التبادل الحراري، كما يوضح الشكل 8. كما يؤكد تصوير الجريان للنتائج العديدة، كما يوضح الشكل 9، مرة أخرى عدم وجود أي إعادة دوران أو حركة دوامية في المائع ضمن قنوات PCHE، عندما يكون رقم رينولدز أقل من 1500. وهذا يدل على أن تحسين الأداء في مبادلات PCHE مموجة القناة ناتج من زيادة سطح التبادل الحراري، بعامل مقياس تابع لقيمة f (المطال على الطول)، عندما يكون رقم رينولدز أقل من 1500. يبين الشكل 10 هبوط الضغط في مبادل PCHE مموج القناة. كما يبين الشكل، يزداد هبوط الضغط بشكل كبير مع زيادة التموج. يبدو أن هبوط الضغط في مبادل PCHE مموج القناة يزداد مع زيادة المطال أو الطول.



الشكل 9 خصائص الجريان في قناة مموجة.



الشكل 10 هبوط الضغط في مبادل PCHE مموج القناة.

4. الاستنتاجات

في هذا البحث، تمت دراسة الأداء الحراري للمبادل PCHE مموج القناة، وتأثيرات عوامل التموج الحراري: المطال والطول، بطريقة عددية. تمت مقارنة الأداء الحراري لمبادل PCHE مموج القناة مع PCHE التقليدي مستقيم القناة. بناء على النتائج العددية، يمكن التوصل للاستنتاجات التالية:

1. يمكن للمبادلات PCHE مموجة القناة أن تحسن الأداء الحراري بشكل كبير مقارنة بالمبادلات PCHE مستقيمة القناة التقليدية، وذلك بقيمة 16.4%.
2. يزداد تحسن الأداء الحراري للمبادلات PCHE مموجة القناة مع زيادة المطال أو الطول. لحجم القناة تأثير أقل أهمية على الأداء الحراري مقارنة بطول الموجة ومطالها.
3. يزداد الأداء الحراري نسبة لوحد الطول مع زيادة المطال. لكن، يتناقص مع زيادة الطول.

4. يعود تحسين الأداء الحراري لمبادلات PCHE مموجة القناة لزيادة مساحة التبادل الحراري، بعامل مقياس تابع لقيمة f في الجريان الصفحي.

المراجع

- [1] J.G. Kwon, T.H. Kim, H.S. Park, J.E. Cha, M.H. Kim, Optimization of airfoil-type PCHE for the recuperator of small scale brayton cycle by cost-based objective function, Nucl. Eng. Des. 298 (2016) 192–200.
- [2] W. Kim, Y.-J. Baik, S. Jeon, D. Jeon, C. Byon, A mathematical correlation for predicting the thermal performance of cross, parallel, and counterflow PCHEs, Int. J. Heat Mass Transf. 106 (2017) 1294–1302.
- [3] B. Halimi, K.Y. Suh, Computational analysis of supercritical CO₂ Brayton cycle power conversion system for fusion reactor, Energy Convers. Manage. 63(2012) 38–43.
- [4] L. Chen, X.-R. Zhang, Experimental analysis on a novel solar collector system achieved by supercritical CO₂ natural convection, Energy Convers. Manage. 77(2014) 173–182.
- [5] J.-W. Seo, Y.-H. Kim, D. Kim, Y.-D. Choi, K.-J. Lee, Heat transfer and pressure drop characteristics in straight microchannel of printed circuit heat exchangers, Entropy 17 (5) (2015) 3438–3457.
- [6] S. Jeon, Y.-J. Baik, C. Byon, W. Kim, Thermal performance of heterogeneous PCHE for supercritical CO₂ energy cycle, Int. J. Heat Mass Transf. 102 (2016) 867–876.

- [7] J. Figley, X. Sun, S.K. Mylavarapu, B. Hajek, Numerical study on thermalhydraulic performance of a printed circuit heat exchanger, *Prog. Nucl. Energy*68 (2013) 89–96.
- [8] K. Nikitin, Y. Kato, L. Ngo, Printed circuit heat exchanger thermal–hydraulicperformance in supercritical CO2 experimental loop, *Int. J. Refrig.* 29 (5) (2006)807–814.
- [9] I.H. Kim, H.C. No, Physical model development and optimal design of PCHE forintermediate heat exchangers in HTGRs, *Nucl. Eng. Des.* 243 (2012) 243–250.
- [10] J.H. Kim, S. Baek, S. Jeong, J. Jung, Hydraulic performance of a microchannelPCHE, *Appl. Therm. Eng.* 30 (14–15) (2010) 2157–2162.
- [11] S. Baek, J.-H. Kim, S. Jeong, J. Jung, Development of highly effective cryogenicprinted circuit heat exchanger (PCHE) with low axial conduction, *Cryogenics*52 (7–9) (2012) 366–374.
- [12] S.-M. Lee, K.-Y. Kim, Optimization of zigzag flow channels of a printed circuitheat exchanger for nuclear power plant application, *J. Nucl. Sci. Technol.* 49 (3)(2012) 343–351.
- [13] S.-M. Lee, K.-Y. Kim, A Parametric Study of the thermal-hydraulic performanceof a zigzag printed circuit heat exchanger, *Heat Transfer Eng.* 35 (13) (2013)1192–1200.
- [14] T. Ma, L. Li, X.-Y. Xu, Y.-T. Chen, Q.-W. Wang, Study on local thermal–hydraulicperformance and optimization of zigzag-type printed circuit heat exchanger athigh temperature, *Energy Convers. Manage.* 104 (2015) 55–66.

- [15] T.L. Ngo, Y. Kato, K. Nikitin, T. Ishizuka, Heat transfer and pressure drop correlations of microchannel heat exchangers with S-shaped and zigzag fins for carbon dioxide cycles, *Exp. Thermal Fluid Sci.* 32 (2) (2007) 560–570.
- [16] S.-M. Lee, K.-Y. Kim, Comparative study on performance of a zigzag printed circuit heat exchanger with various channel shapes and configurations, *Heat Mass Transfer* 49 (7) (2013) 1021–1028.
- [17] P. Gschwind, A. Regele, V. Kottke, Sinusoidal wavy channels with Taylor-Goertler vortices, *Exp. Thermal Fluid Sci.* 11 (3) (1995) 270–275.
- [18] T.a. Rush, T.a. Newell, A.m. Jacobi, An experimental study of flow and heat transfer in sinusoidal wavy passages, *Int. J. Heat Mass Transf.* 42 (9) (1999) 1541–1553.
- [19] X. Xu, T. Ma, L. Li, M. Zeng, Y. Chen, Y. Huang, Q. Wang, Optimization of fin arrangement and channel configuration in an airfoil fin PCHE for supercritical CO₂ cycle, *Appl. Therm. Eng.* 70 (1) (2014) 867–875.
- [20] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, *Foundations of Heat Transfer*, 6th ed., John Wiley & Sons Inc, 2011.
- [21] E.W. Lemmon, M.L. Huber, M.O. McLinden, NIST standard reference database 23: reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, Version 9.0 ed: National

Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2010.

[22] I.-H. Kim, H.-C. No, J.-I. Lee and B.-G. Jeon, Thermal hydraulic performance analysis of the printed circuit heat exchanger using a helium test facility and CFD simulations, Nucl. Eng. Des. 239 (2009) 2399–2408.

[23] E.S. Kim, C.H. Oh, S. Sherman, Simplified optimum sizing and cost analysis for compact heat exchanger in VHTR, Nucl. Eng. Des. 238 (2008) 2635–2647.